

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 62 – 51: 62 – 526: 629.423.3

4.6. МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

THE METHOD OF SUCCESSIVE SYNTHESIS OF ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF HIGH – SPEED AC ELECTRIC DRIVE

Симаков Геннадий Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета. Россия, 620092, г. Новосибирск, Проспект К. Маркса 20,

E-mail: Simakov44_86@mail.ru. Тел.: +79059453923.

Филушов Юрий Петрович, кандидат технических наук, инженер ФГУП ПО «Север»

Россия, 620077, г. Новосибирск, E-mail: filushov@mail.ru. Тел.: +79059453923.

Аннотация: В работе рассматривается метод синтеза, обеспечивающий формирование энергоэффективного управления быстродействующим электроприводом переменного тока. Представлены оценки качества, позволяющие связать основные свойства работы электрической машины с законом управления.

Abstract: In work the method of synthesis, providing the formation of energy-efficient control of high-speed AC electric drive. Presented quality assessment to relate the basic properties of electrical machines with control law.

Ключевые слова: энергоэффективное управление, быстродействующий электропривод, алгоритм.

Key words: Energy-efficient management, high-speed electric drive.

НЕДОСТАТКИ ИЗВЕСТНЫХ МЕТОДОВ

Любая система управления должна наилучшим образом отвечать тем требованиям, которые к ней предъявляются. Наиболее общими требованиями к работе электропривода, являющегося энергосиловой установкой, являются требования к динамическим и энергетическим свойствам. Динамические свойства зависят от времени и качества переходных процессов. Основные энергетические свойства электропривода определены коэффициентом полезного действия и $\cos(\varphi)$, характеризующим эффективность использования мощности, подводимой к обмоткам электрической машины. Электрическая машина является многоканальным объектом, где, в качестве основной выходной величины выступает электромагнитный момент, являющийся произведением двух регулируемых переменных.

На международном рынке можно выделить ряд фирм, занимающих лидирующее место в производстве электропривода переменного тока. По аналогии с машинами постоянного тока, существующие законы определены концепцией управления при стабилизации энергии магнитного поля, частным случаем которого является управление при стабилизации потокосцепления

статора, ротора или потокосцепления в воздушном зазоре. Это направление [1] сформулировано в работе Blaschke F. 1971 г. и до настоящего времени считается доминирующим при формировании систем векторного управления быстродействующим электроприводом переменного тока. Путем стабилизации одной из регулируемых переменных (потокосцепления), управление электрической машиной искусственно приводится к виду одноканальной системы. Такой подход облегчает синтез управляющих воздействий электрической машины, уделяя основное внимание динамическим оценкам качества, но значительно ограничивает возможности управления, не позволяя регулировать энергетические свойства, показатели которых, наряду с электромагнитным моментом, могут выступать в качестве выходных величин. Несмотря на широкое применение, управление электрической машиной при стабилизации потокосцепления имеет ряд существенных недостатков. К ним относятся значительное снижение $KПД$ и $\cos(\varphi)$ при отклонении нагрузки от номинальной величины. Ясно видна ограниченность ресурсов по управлению и сложность достижения скоростей движения во второй зоне регулирования. Необходимость предварительного намагничивания магнитной

системы электрической машины существенно снижает потребительские свойства всего электропривода в целом. Желание повысить эффективность процессов электромеханического преобразования энергии заставляет разработчиков улучшать энергетические характеристики электрической машины путем увеличения массы активных материалов. Результатом является повышение в номинальных режимах КПД на 5 – 7 % за счет увеличения массы активных материалов двигателя на 30 – 40 %. Но эти дорогостоящие решения в значительной мере утрачивают свое преимущество, если часть цикла электрическая машина работает не в номинальном режиме. Поэтому задача повышения эффективности работы электрической машины средствами электропривода, при сохранении высоких динамических свойств, требует своего решения [2].

СВЯЗИ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Поиск таких решений приводит к необходимости сопоставить между собой отдельные свойства, что выполняется посредством весовых коэффициентов. Однако назначение весовых коэффициентов осуществляется произвольно или, в лучшем случае, по некоторым экспертным оценкам. Чтобы избежать ошибочных результатов субъективного сопоставления требований, предъявляемых к работе электропривода, следует в явном виде определить связь основных свойств работы электрической машины между собой [3].

Исследование уравнения баланса мощностей показывает, состояние обобщенной электрической машины зависит от четырех независимых переменных. В качестве таких переменных могут выступать электромагнитный момент m , угловая скорость вращения ротора ω и два аргумента β, φ , которых достаточно для определения положения всех векторов. Из приведенного числа переменных, m и ω заданы условиями технологической задачи. Варьируемыми величинами являются аргументы β, φ , посредством которых осуществляется поиск энергетически желаемых режимов работы электрической машины. Здесь угол φ определяет положение вектора ЭДС от потокоцепления статора относительно тока ротора, угол β определяет положение вектора потокоцепления статора, относительно вектора тока ротора, ориентированного по продольной оси вращающейся системы координат, R_s – активное сопротивление обмоток статора. Применяя силовые характеристики, определены основные оценки качества работы электропривода в зависимости от аргументов φ и β , характеризующих положение векторов и частоты вращения ротора. В качестве силовых характеристик выступают m электромагнитный момент, w энергия магнитного поля, ΔP тепловые потери и u напряжение подводимые к обмоткам двигателя:

$$f(\varphi, \beta) = \frac{2w}{m},$$

$$F(\varphi, \beta) = \frac{\Delta P}{m}, \quad f_u(\beta, \varphi) = \frac{u^2}{R_s m}$$

Аналитические связи силовых характеристик $f(\varphi, \beta)$, $F(\varphi, \beta)$, $f_u(\beta, \varphi)$ названы функциями энергетического состояния. Применяя их, определены взаимосвязанные критерии качества, позволяющие оценить динамические и энергетические свойства электропривода, и оценить эффективность использования напряжения, подводимого к обмоткам электрической машины при различных способах управления. Связи оценок качества, в зависимости от аргументов, определяющих закон управления, наглядно представлены на рисунке 1. В качестве оценок качества выступают: T_d – оценка интенсивности процессов электромеханического преобразования энергии, η – коэффициент полезного действия, $U_o, \cos(\varphi)$ – эффективность использования напряжения и мощности, подводимой к обмоткам электрической машины. Здесь интерес представляет оценка интенсивности процессов электромеханического преобразования энергии T_d , полученная путем исследования уравнения баланса мощностей при ограничении мощности, подводимой к обмоткам двигателя.



Рис. 1. Связи основных оценок качества электропривода переменного тока

Для некоторых типов электрических машин (синхронная машина с электромагнитным возбуждением, асинхронная машина с короткозамкнутым ротором), аргументы β, φ связаны между собой, в этом случае функции энергетического состояния могут быть выражены посредством одного аргумента.

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО СИНТЕЗА

Если для одноканальной системы выбор метода синтеза управляющих воздействий не является сложной задачей, то для многоканального объекта, каким является электрическая машина переменного тока, выбор метода синтеза всегда является проблемой. Дело в том, что регулируемые переменные связаны как между собой, так и посредством умножения и деления, нелинейно связаны с выходными величинами, поэтому формирование управляющих воздействий вызывает значительные сложности даже в статических режимах. В динамических процессах, многообразие

траекторий регулируемых переменных ставит задачу выбора наилучшей траектории, что требует применение вариационных методов.

Для решения задачи управления быстродействующим электроприводом, применен принцип максимума Л.С. Понтрягина. Рассматривается самый простой функционал качества – время. Поскольку в качестве основной выходной величины выступает электромагнитный момент, основное уравнение движения не рассматривается. Такой подход, не искажая результатов, дает уменьшение порядка системы дифференциальных уравнений, что позволило получить аналитическое решение задачи. Формулировка задачи следующая. Определить вектор управления, принадлежащий замкнутой области пространства допустимых управлений, обеспечивающий перевод электрической машины из начального состояния, в состояние, определенное заданным значением выходной величины, за минимальное время при одновременном регулировании энергетических свойств, оценки которых, наряду с электромагнитным моментом, могут выступать в качестве выходных величин. Под допустимым управлением понимается все множество управлений, позволяющих сформировать заданные значения выходных величин.

Результаты решения задачи быстродействия показывают, изменение состояния электрической машины за минимальное время, при формировании электромагнитного момента в заданных условиях, возможно только при одинаковом характере изменения регулируемых переменных, что достигается путем определенной настройке регуляторов [4]. Не осуществляя предварительного намагничивания магнитной системы электрической машины, такой подход к формированию управления позволяет регулировать энергетические характеристики, при стандартном характере изменения электромагнитного момента. Для этой цели, задаваясь взаимосвязанными оценками качества, посредством функций энергетического состояния, определены аргументы, позволяющие сформировать задание на управление, обеспечивающее желаемые энергетические свойства работы электропривода. Такой подход позволил существенно упростить задачу управления и разрешить ее в аналитическом виде для различных типов электропривода переменного тока [5]. По результатам проведенной работы разработана методология формирования управляющих воздействий, обеспечивающих энергетически эффективное регулирование момента быстродействующего электропривода. Установленные связи оценок качества позволяют определить большую гамму законов управления, обеспечивающих желаемое сочетание энергетических и динамических свойств работы

электропривода в условиях ограничения напряжения, подводимого к обмоткам двигателя.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим наиболее интересные законы управления, сформированные для различных типов электрических машин посредством разработанной методики последовательного синтеза.

Для синхронной машины с электромагнитным возбуждением, формирование электромагнитного момента, предварительно намагниченной машины, осуществляют в условиях стабилизации тока ротора. С ростом нагрузки, при таком способе управления, наблюдается существенный рост реактивной мощности, а коэффициент полезного действия, при отклонении нагрузки от номинальной величины, снижается. Этих недостатков лишен способ формирования электромагнитного момента при минимизации тепловых потерь и минимуме реактивной мощности [6]. Сформированное методом последовательного синтеза управление, не осуществляя предварительного намагничивания, обеспечивает заданные энергетические свойства в статических и динамических режимах.

Такие же результаты получены при управлении (синхронной машиной с постоянными магнитами) *СДПМ*. Традиционно, формирование электромагнитного момента этой машины осуществляется током по поперечной оси, что, с ростом нагрузки вызывает рост реактивной мощности, а, следовательно, и напряжения. Рост напряжения ограничивает возможность форсирования управляющих воздействий, не позволяя повысить быстродействие электропривода. В соответствии с разработанной методикой последовательного синтеза определено управление *СДПМ*, обеспечивающее формирование электромагнитного момента в условиях минимума реактивной мощности.

Несомненный интерес вызывает формирование разработанным методом управления асинхронной короткозамкнутой машины быстродействующего электропривода. Традиционно, управление асинхронной машиной быстродействующего электропривода формируется в системе вращающихся координат, при стабилизации потокосцепления ротора. Отклонение нагрузки от номинальной величины вызывает снижение коэффициента полезного действия и увеличение реактивной мощности. Значительный ток намагничивания, при малых нагрузках, существенно снижает энергетические возможности работы двигателя. На основании полученных взаимосвязей оценок качества, метод последовательного синтеза позволяет формировать управляющие воздействия асинхронной короткозамкнутой машины, обеспечивающие формирование электромагнитного момента в условиях минимума реактивной мощности. Не

осуществляя предварительного намагничивания магнитной системы машины, такое управление позволит значительно улучшить энергетические характеристики быстродействующего электропривода [7].

Еще эффективнее управление асинхронной машиной с короткозамкнутым ротором обеспечит комбинированное управление, сформированное посредством применения метода последовательного синтеза. При низкой скорости вращения ротора машины, предлагается формировать электромагнитный момент в условиях минимума тепловых потерь. Обладая несомненными достоинствами, такое управление возможно только при значительной реактивной мощности. В силу отсутствия ЭДС, при малой скорости вращения ротора, к обмоткам двигателя подводится вся мощность источника питания для быстрого изменения электромагнитного момента. С ростом скорости вращения ротора, растет и ЭДС. В этом случае целесообразно уменьшать реактивную мощность в функции скорости вращения ротора таким образом, чтобы обеспечить стабилизацию КПД на заданном уровне. При дальнейшем росте скорости вращения ротора, реактивная мощность достигает своего минимального значения. Дальнейшее ее уменьшение не возможно. В этом случае, увеличение скорости вращения ротора сопровождается при минимальном значении реактивной мощности и увеличении КПД [8]. Интегральная оценка КПД работы электрической машины в переходных процессах, при рассмотренном способе управления, по сравнению с управлением в таких же условиях при стабилизации потокосцепления ротора, позволит экономить электрическую энергию быстродействующего электропривода на 7 - 9 %.

ВЫВОДЫ

- 1 Разработанная теория управления электрической машиной переменного тока определяет методологию формирования воздействий, обеспечивающих быстрое изменение электромагнитного момента в условиях высокой энергетической эффективности преобразования энергии.
- 2 Сформулированный метод способствует решению практически важных задач энергосбережения и ресурсосбережения быстродействующего электропривода переменного тока.
- 3 Требование к управлению, сформированному посредством функций энергетического состояния и взаимосвязанных оценок качества, позволяет на стадии проектирования определить законы, наилучшим образом реализующие возможности электрической машины для достижения цели управления. Такой подход позволяет снизить массогабаритные показатели электропривода

переменного тока и удешевить его эксплуатацию и производство.

4 Концепция комплексного подхода к формированию энергоэффективного управления различными типами машин переменного тока быстродействующего электропривода создает основу для выбора наилучших соотношений динамических и энергетических показателей качества, что особенно важно как для станочного электропривода, электропривода металлургического производства, тягового электропривода подвижного состава, так и для массового электропривода.

5 Совокупность разработанных теоретических положений и практических результатов создает объективные предпосылки для внедрения в практику электроприводов нового поколения, посредством которых, не осуществляя предварительного намагничивания магнитной системы, обеспечивается наиболее полное использование потенциальных возможностей электрической машины и источника питания для реализации стоящих задач управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1]. Blashke F. Das Prinzip der Feldorientierung die Grundlage fur die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen // Siemens Zeitschrift, 1971, Bd. - Н.10. – S. 757 – 760.
- [2]. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.
- [3]. Филюшов Ю.П. Метод оптимального синтеза управляющих воздействий машины переменного тока. / Электротехника. 2012. № 8. С. 8 - 28.
- [4]. Simakov G.M, Filushov U.P. Management of a multichannel object / EEM December 2-6, 2014. Electrical engineering. Energy mechanical engineering. International scientific conference of young scientists. In 3 sections, section1/ ISBN 978-5-7782-2544-2. On page(s): 190-198.
- [5]. Филюшов Ю.П. Оптимизация электромагнитных процессов в синхронной машине/ Электричество. 2011. № 8.
- [6]. Simakov G.M, Filushov U.P. Energy - efficient control of synchronous machine / 2014 12th International conference on actual problems of electronic instrument engineering proceedings. IEEE Catalog Number CFP14471PRT.Volume7. On page(s): 153-158.
- [7]. Филюшов Ю.П. Филюшов В.Ю. Оптимизация электромагнитных процессов асинхронной машины. Электричество / 2011. № 5. С. 42 - 47.
- [8]. Филюшов Ю.П. Энергоэффективное управление асинхронной машиной./ Электротехника 2014. № 6. С.57-65.